

内部に未知の振動源を有する建物の剛性と減衰の同時同定法

STIFFNESS-DAMPING SIMULTANEOUS IDENTIFICATION OF BUILDINGS INCLUDING UNKNOWN INNER VIBRATION SOURCE

吉 富 信 太*, 前 田 朋 宏**, 竹 脇 出***

Shinta YOSHITOMI, Tomohiro MAEDA and Izuru TAKEWAKI

In this paper, a new stiffness-damping simultaneous identification method for a building structure is proposed when the building includes an unknown inner vibration source. The feature of this method is that the present identification can be performed even though the location and time-history of the vibration source in addition to all stiffness and damping coefficients are unknown. By performing limit manipulation, the relations between stiffnesses of consecutive stories and those between damping coefficients of consecutive stories can be obtained from the acceleration data at the floors just above and below the object story which can be recorded by using at least two sensors. The level of stiffness and damping coefficients can be determined to satisfy the recorded lowest natural frequency and the lowest damping ratio. The validity of the proposed method is examined through numerical examples using theoretical data and actually recorded data.

Keywords: System identification, Structural health monitoring, Unknown vibration source, Stiffness-damping simultaneous identification

システム同定, 構造ヘルスモニタリング, 未知振動源, 剛性・減衰同時同定

1. 序

システム同定技術は, 現実の構造物と設計モデルの対応を明らかにすることや, 構造ヘルスモニタリングにおける主要な要素技術として益々その重要性を増しつつある^{1,2)}. システム同定には大きく分けて, モーダルパラメータ同定と物理パラメータ同定が存在する. また, その混合手法も存在する. モーダルパラメータ同定は, 一般に安定した結果が得られるという点や比較的少ない観測データから同定が可能であるという長所を有している. それに対して物理パラメータ同定は, 制振技術などでその重要性が指摘されているにも拘わらず, 多くの観測データを必要とすることや, 安定した結果が得にくいといった欠点が存在する.

システム同定に用いるデータとしては, 地震動によるデータなどの他に常時微動データが用いられることがある. 常時微動をシステム同定のためのデータとして用いる際には, 地動による応答と建物内部の振動源による応答のどちらが大きいかにより取り扱いが異なる. 本論文では, 後者が大きい場合を想定し, 建物内に位置と時刻歴が未知の一つの振動源がある場合のシステム同定問題を扱う.

本論文に関連する研究には次のようなものが存在する. 濱本らは, 固有振動数の変化に着目した多層建築物の層損傷検出手法を提案している^{3,4)}. 金子らは, 地震後の架構全体の動特性の変化と損傷レベルの関係を定量化する方法をRC造架構に対して示している⁵⁾. 斎藤は, 多入力多出力系の同定問題に特定の制約を導入する方法を提案している⁶⁾. また, 推定値の確率論的誤差評価法を提示している⁷⁾. 原口は, 常時微動観測結果から構造物-地盤連成系モデルのパラメータを同定する手法を提案している⁸⁾. 三田らは, 損傷の直接的指標

である層剛性を, 信頼性の高いモード情報のみに基づき安定的かつ簡便に同定する手法について検討し, 部分空間法による方法を提案している⁹⁾. また, 多入力多出力系の同定に関連して, 構造物の非線形応答を等価線形モデルで取り扱い, 時間分解能と安定性を考慮したオンライン推定手法を提案している¹⁰⁾. 曾根ら¹¹⁾や来田ら¹²⁾は, ウェーブレット変換によるシステム同定法を提案し, 仁田と西谷¹³⁾は, 入力の同定も含む絶対加速度を用いた2段階同定法を提案している.

本論文と関連の深い研究として, 建築構造物の各層の剛性及び減衰を, 当該層の直上及び直下の地震動による計測データをもとに同定する物理パラメータ同定法が中村, 竹脇らによって提案されている^{14,15)}. 建物内に入力(振動源)がある場合のシステム同定についても, 入力の時刻歴が未知の場合の同定法が提案されているが¹⁶⁾, ある層の剛性や減衰が既知である必要があり, 全ての剛性や減衰が不明である本論文で扱う問題のような場合には適用できない.

本研究では, 建物内に入力(振動源)が存在する状況下で, 入力(振動源)の時刻歴と全ての層剛性・減衰が不明な場合でも建物特性が同定可能な手法を提案する.

2. 入力が未知の場合の剛性・減衰の同定法

本論文では, 文献[14,16]の定式化を一部利用するため, 文献[14,16]の部分的要点を2節に示す. 図1に示す線形弾性剛性, 線形粘性減衰, 線形履歴減衰を有する N 層せん断型構造物モデルを考える. 節点及び要素番号を建物最上層から付けることとし, 第 j 番目の質量, 剛性, 粘性減衰係数, 履歴減衰定数を, それぞれ m_j , k_j , c_j , β_j とする. また, 第 j 番目の複素剛性を $k_j^* = k_j(1 + 2\beta_j i)$ とす

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
助教・博士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 大学院生

*** 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授・工博

Assist. Prof., Dept. of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University
Prof., Dept. of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

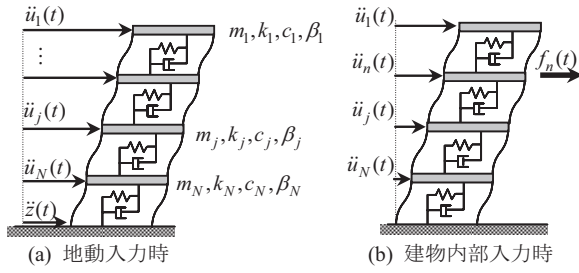


図1 N層せん断型構造物モデル

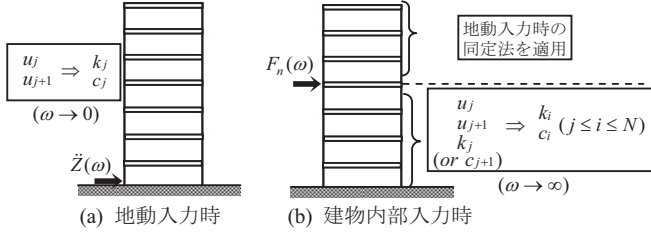


図2 剛性・減衰の同定法^{14,16)}

る。iは虚数単位を表す。

地動入力時は、図2(a)に示すように、同定の対象層の直上及び直下の層の水平変位のみを用いて、対象層の層剛性・層減衰係数を同定できる。建物内部に振動源がある場合（以下、建物内部入力時）は、図2(b)に示すように、2つの連続した層の応答及びその層の剛性（または減衰係数）が既知であれば、その層以下の全層の剛性及び減衰係数が同定できる。

2.1 地動入力に対する応答を用いた剛性・減衰の同定法

地動入力加速度及び、上層側床の絶対加速度を $\ddot{z}(t)$ 、 $\ddot{u}_j(t)$ とし、 $\ddot{z}(t)$ 、 $\ddot{u}_j(t)$ のフーリエ変換を $\ddot{Z}(\omega)$ 、 $\ddot{U}_j(\omega)$ とすると、運動方程式のフーリエ変換は次式で表される。

$$\mathbf{A}(\omega)\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{F}(\omega)\mathbf{Z}(\omega) \quad (1)$$

$\mathbf{U}(\omega)$ 、 $\mathbf{Z}(\omega)$ は、第j番目の床の絶対変位 u_j を要素とするベクトル $\mathbf{u} = \{u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N\}^T$ のフーリエ変換及び、地動変位 $z(t)$ のフーリエ変換を表す。 $\mathbf{F}(\omega) = \{0 \ 0 \ \dots \ i\omega c_N + k_N^+\}^T$ であり、 $(\)^T$ は行列の転置を表す。 $\mathbf{A}(\omega)$ は次式で表される。

$$\mathbf{A}(\omega) = \begin{bmatrix} a_1(\omega) & -b_1(\omega) & & & 0 \\ -b_1(\omega) & a_2(\omega) & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & -b_{N-1}(\omega) & \\ 0 & & & -b_{N-1}(\omega) & a_N(\omega) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$a_j(\omega) = -\omega^2 m_j + i\omega c_{j-1} + k_{j-1}^+ + i\omega c_j + k_j^+ \\ = -\omega^2 m_j + b_{j-1}(\omega) + b_j(\omega) \quad (3)$$

$$b_j(\omega) = (i\omega)c_j + k_j^+ \quad (4)$$

(1)式より、 $\mathbf{U}(\omega)$ の第j成分 $U_j(\omega)$ は次のように求められる。

$$U_j(\omega) = \frac{\Delta_j(\omega)}{P_N(\omega)} \mathbf{Z}(\omega) \quad (5)$$

ここで、 $P_j(\omega)$ は行列 $\mathbf{A}(\omega)$ の左上から定義した $j \times j$ 小行列の行列式を表す。 $\Delta_j(\omega)$ は $\mathbf{A}(\omega)$ の第j列を $\mathbf{F}(\omega)$ で置き換えた行列の行列式を表し、行列の三重対角性を利用した演算により次式を得る。

$$\Delta_j(\omega) = b_N(\omega) \dots b_j(\omega) P_{j-1}(\omega) \quad (6)$$

(6)式を(5)式に代入して、次式を得る。

$$\frac{U_j(\omega)}{U_{j+1}(\omega)} = b_j(\omega) \frac{P_{j-1}(\omega)}{P_j(\omega)} \quad (7)$$

(7)式より、変位応答の比率は地動入力とは無関係に決まることが分

かり、このことは地動入力の時刻歴が不明でも同定が可能であることと関連している。(7)式を展開し、剛性と減衰を同定するための次式を誘導する手順が文献[14]に示されている。

$$k_j(1 + 2\beta_j i) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{M_j(i\omega)^2 U_j(\omega)}{U_{j+1}(\omega) - U_j(\omega)} \quad (8)$$

$$c_j = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \text{Im} \left[\frac{M_j(i\omega)^2 U_j(\omega)}{U_{j+1}(\omega) - U_j(\omega)} \right] \quad (9)$$

ここで、 $M_j = \sum_{i=1}^j m_i$ は上から第j番目の層までの質量の和。

(8)式の実部より剛性 k_j が同定でき、虚部より履歴減衰定数 β_j が同定できる。さらに(8)式の右辺の関数の勾配の $\omega \rightarrow 0$ における極限から粘性減衰係数 c_j が(9)式のように同定できる。尚、変位の代わりに速度や加速度を用いても同様に同定が可能である。

2.2 未知の建物内振動源に対する応答を用いた剛性・減衰の同定法

文献[16]に示されている、建物内部に未知の入力（振動源）が存在する場合のせん断型構造物の各層の剛性・減衰の同定法の概要を以下に示す。尚、以下の同定法は、振動源より下層側の同定を対象とする。振動源以上の層の同定は、2.1節の手法によって可能である。以下では振動源の荷重効果を荷重時刻歴で表す。

建物の上から第n番目の層に荷重 $f_n(t)$ が入力される場合を想定する。 $F_n(\omega)$ を $f_n(t)$ のフーリエ変換とすると、運動方程式は、(1)式右辺の $\mathbf{F}(\omega)\mathbf{Z}(\omega)$ を、 $\mathbf{F}(\omega) = \{0 \ \dots \ F_n(\omega) \ \dots \ 0\}^T$ に置き換えたものとなる。ここでは履歴減衰を考慮せず、(3)、(4)式における k_j^+ を k_j に読み替える。このとき、(5)式とほぼ類似の式が成立し、(6)式と同様に行列の3重対角性を利用した演算により、2つの連続した層の変位応答の比率に関して次式が成立する。

$$\frac{U_{j+1}(\omega)}{U_j(\omega)} = b_j(\omega) \frac{R_{j+2}(\omega)}{R_{j+1}(\omega)} \quad (10)$$

ここで、 $R_j(\omega)$ は行列 $\mathbf{A}(\omega)$ の右下から定義した $j \times j$ 小行列の行列式を表す。(7)式と同様に、(10)式より、応答の比率は入力とは無関係に決まることが分かる。このことは、荷重時刻歴が不明でも同定が可能であることと関連している。

上から第j番目の層せん断力を速度で除した量に相当する $r_j(\omega)$ （(11)式で定義）に対して $\omega \rightarrow \infty$ の極限を導入し、剛性 k_j 及び減衰係数 c_j を同定する(12)、(13)式を導く手順が文献[16]に示されている。

$$r_j(\omega) = \frac{b_j(\omega)}{(i\omega)} \left[1 - \frac{U_{j+1}(\omega)}{U_j(\omega)} \right] \quad (11)$$

$$k_j = \frac{c_j^2}{m_{j+1}} + \lim_{\omega \rightarrow \infty} (r_j(\omega) - c_j)(i\omega), \quad m_{N+1} = \infty \quad (12)$$

$$c_j = \lim_{\omega \rightarrow \infty} r_j(\omega) \quad (13)$$

k_j, c_j の同定のためには $r_j(\omega)$ が必要であるが、本手法の特徴の一つは、一つの $r_j(\omega)$ が得られれば、漸化式を用いて $r_{j+1}(\omega)$ を得ることができることにある。以下にその手順について示す。

(11)式より $r_j(\omega)$ は $U_j(\omega)$ 、 $U_{j+1}(\omega)$ のみならず $b_j(\omega) = (i\omega)c_j + k_j$ 即ち、同定対象の k_j, c_j も含む。 $U_j(\omega)$ 、 $U_{j+1}(\omega)$ に加えて、一つの k_j または c_{j+1} を既知量とすることにより $r_j(\omega)$ を求めることができるが、ここでは k_j を既知量とする。このとき c_j は(13)式によらず、 $U_j(\omega)$ 、 $U_{j+1}(\omega)$ のみを用いて(14)式のようにも評価できる。

$$\frac{c_j}{m_{j+1}} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left[\frac{(i\omega)U_{j+1}(\omega)}{U_j(\omega)} \right] \quad (14)$$

従って、 $U_j(\omega)$ 、 $U_{j+1}(\omega)$ 、 k_j が既知量であれば $r_j(\omega)$ を求めることができる。次に一つの $r_j(\omega)$ から次の $r_{j+1}(\omega)$ を以下のように求めることができる。(11)式に(10)式を代入して次式を得る。

$$r_j(\omega) = \frac{b_j(\omega)}{(i\omega)} \left[1 - \frac{R_{j+2}(\omega)}{R_{j+1}(\omega)} b_j(\omega) \right] \quad (15)$$

ここで、 $R_j(\omega)$ は、次の漸化式を満足する。

$$R_j(\omega) = a_j(\omega)R_{j+1}(\omega) - b_j^2(\omega)R_{j+2}(\omega), \quad 1 \leq j \leq N \quad (16)$$

(16)式の漸化式より、 $r_{j+1}(\omega)$ は $r_j(\omega)$ を用いて次式で表される。

$$r_{j+1}(\omega) = \frac{m_{j+1}b_j(\omega) - \left[m_{j+1}(i\omega) + \frac{b_j(\omega)}{(i\omega)} \right] r_j(\omega)}{r_j(\omega) - \frac{b_j(\omega)}{(i\omega)}} \quad (17)$$

以上より、 $U_j(\omega)$ 、 $U_{j+1}(\omega)$ 及び k_j の 3 つの量が既知であれば、上から第 j 番目の層以下の全層の剛性・減衰を同定できる。尚、変位の代わりに速度や加速度を用いても同様に同定が可能である。

2.1 節の地動入力時と 2.2 節の建物内部入力時の同定法を比較すると、(7)式と(10)式の形式は類似しており、いずれも応答の比率は入力に依存しない。一方、地動入力時には全ての剛性・減衰が未知でもよいのに対し、建物内部に振動源を有する場合においては、ある一つの層剛性 k_j が既知である必要がある。この差は、(7)式に含まれる行列式 R_j は $\mathbf{A}$ の左上から定義され、 R_j を含む漸化式を解く際に初項に含まれる最上層の k_1, c_1 が消去されるのに対し、(10)式の行列式 P_j は $\mathbf{A}$ の右下から定義され、 P_j を含む漸化式を解く際に初項に含まれる上から N 番目の k_N, c_N 及び $N-1$ 番目の k_{N-1}, c_{N-1} が、消去されず層の間の比のみが規定されることに起因している。

3. 建物内部に未知の振動源が存在する場合のシステム同定

3.1 提案する同定法の概要

2 節で示した既往の同定法は、地動入力、建物内部入力のいずれの場合も、入力の時刻歴が不明の場合の同定が可能である。ただし、建物内部入力の場合は、1つの層の k_j または c_{j+1} が既知である必要がある。本論文では、内部に振動源が存在する場合の建物について、入力の時刻歴及び全層の剛性や減衰が未知という、より現実的な場面を想定した場合の同定法を提案する。本論文で提案する手法が文献[16]の手法と異なる点は、剛性・減衰が全て未知である場合を扱える点と、 $\omega \rightarrow 0$ の極限を用いる点である。

尚、本論文で新たに提案する手法は、上記 2 節の手法と同様に、線形の材料特性を有するせん断型構造物を対象としており、全体曲げ変形の影響を無視できない高層建物の場合、材料非線形性を有する場合、上部構造物の複数層に同時に入力がある場合などには直接適用できない。また、履歴減衰は考慮しない。

建物内部の入力の時刻歴が不明な場合について、新たに提案する同定法の概略を図 3 に、概略フローを図 4 に示す。本同定法では、荷重入力層の上層側と下層側で操作が異なる。荷重入力層より上層側においては、2.1 節の地動入力時の方法をそのまま適用できる。一方、荷重入力層より下層側においては、まず全剛性を同定し、続いて全減衰係数を同定する。本提案手法では、層の加速度応答データを用いて層剛性の比率及び減衰係数間の関係式が同定できる。さらに、別途計測されている 1 次固有円振動数と、1 次減衰定数を用いることにより、剛性及び減衰係数の大きさを決定することができる。

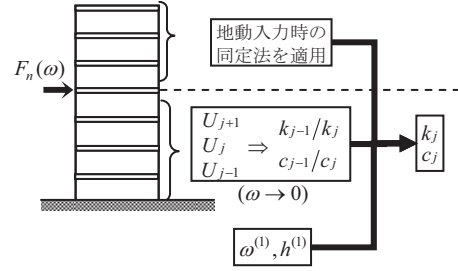


図 3 本論文で提案する剛性・減衰の同定法の概念図

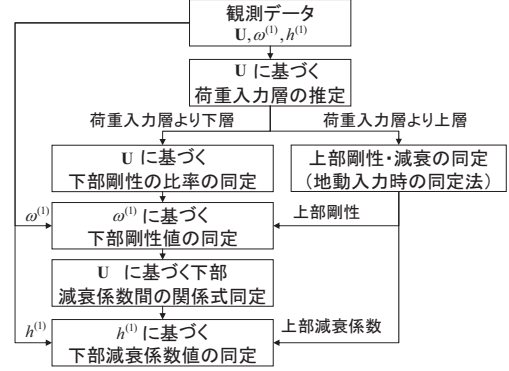


図 4 本論文で提案する剛性・減衰の同定法のフローチャート

3.2 全ての剛性・減衰が未知の場合の同定法

3.2.1 荷重入力層より上層の層剛性・減衰の同定

荷重入力層より上層については、2.1 節の地動入力時の同定法によって、剛性及び減衰の同定が可能である。

3.2.2 荷重入力層以下の層剛性比率の同定

荷重入力層以下の層において、連続した 2 層の振動数領域における変位応答の比率を用いて層剛性の比率を得ることができる。尚、剛性の大きさの決定法については、3.2.4 節において論じる。

まず、剛性・減衰の同定の証明に必要な次の特性を証明する。

(特性 1)

$$\frac{(i\omega)}{b_j} r_j(\omega) = \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega)\alpha_j + O_j(\omega^2) \quad (n+1 \leq j \leq N) \quad (18)$$

ここで、 α_j は ω によらない定数、 $O_j(\omega^2)$ は第 j 番目の関係式における ω^2 以上のオーダーの項を表す。

(証明)

以下では、特に断らない限り ω の関数であることを表す (ω) を省略する。定義より R_N 、 R_{N-1} は次のように得られる。

$$R_N = a_N \quad (19)$$

$$R_{N-1} = \begin{bmatrix} a_{N-1} & -b_{N-1} \\ -b_{N-1} & a_N \end{bmatrix} = a_N a_{N-1} - b_{N-1}^2 \quad (20)$$

(19)、(20)式を(16)式に代入して、次式を得る。

$$R_{N+1} = 1 \quad (21)$$

(20)、(21)式を(16)式に代入して、次式を得る。

$$R_{N+2} = 0 \quad (22)$$

まず、 $j = N$ のとき、(15)、(21)、(22)式より次式が成立する。

$$\frac{(i\omega)}{b_N} r_N = \left(1 - \frac{R_{N+2}}{R_{N+1}} b_N \right) = \left[1 - \frac{0}{1} \{k_N + (i\omega)c_N\} \right] = 1 \quad (23)$$

(23)式は(18)式を満足する ($\alpha_N = 0$ 、 $O_N(\omega^2) = 0$ に相当)。

次に、 $j = l$ のとき、(18)式が成立すると仮定すると、次式を得る。

$$\frac{(i\omega)}{b_l} r_l = \frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_l + O_l(\omega^2) \quad (24)$$

$j=l-1$ のとき, (15), (16)式より次式が成立する.

$$\frac{(i\omega)}{b_{l-1}} r_{l-1} = \frac{\frac{(i\omega)^2}{b_l} m_l + \frac{(i\omega)}{b_l} r_l}{\frac{(i\omega)^2}{b_l} m_l + \frac{b_{l-1}}{b_l} + \frac{(i\omega)}{b_l} r_l} \quad (25)$$

(25)式に(24)式を代入し, $\omega=0$ の周りでテイラー展開することにより次式を得る.

$$\begin{aligned} \frac{(i\omega)}{b_{l-1}} r_{l-1} &= \frac{\frac{(i\omega)^2}{k_l + (i\omega)c_l} m_l + \frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_l + O_l(\omega^2)}{\frac{(i\omega)^2}{k_l + (i\omega)c_l} m_l + \frac{k_{l-1} + (i\omega)c_{l-1}}{k_l + (i\omega)c_l} + \frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_l + O_l(\omega^2)} \\ &\cong \frac{\frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1}}{\frac{k_{l-1}}{k_l} + \frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1}} + (i\omega) \alpha_{l-1} + O_{l-1}(\omega^2) \\ &= \frac{1}{k_{l-1}} \left(\sum_{i=l-1}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_{l-1} + O_{l-1}(\omega^2) \end{aligned} \quad (26)$$

ここで,

$$\alpha_{l-1} = - \frac{\alpha_l \frac{k_{l-1}}{k_l} - \frac{1}{k_l} \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \left(\frac{c_{l-1} k_l - k_{l-1} c_l}{k_l^2} \right)}{\left\{ \frac{k_{l-1}}{k_l} \left(\sum_{i=l-1}^N \frac{1}{k_i} \right) \left(\sum_{i=l}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \right\}^2} \quad (27)$$

(26)式は(18)式を満足する.

以上より, (18)式は証明された.

(証明終)

次に, 剛性の比率の同定に関する以下の特性を証明する.

(特性2)

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Re}[g_j(\omega)] = \frac{k_{j-1}}{k_j} \quad (28)$$

ここで,

$$g_j(\omega) = \frac{1 - \frac{U_{j+1}(\omega)}{U_j(\omega)}}{\frac{U_{j-1}(\omega)}{U_j(\omega)} - 1} \quad (29)$$

(証明)

(29)式に(11)式を代入して次式を得る.

$$g_j = \frac{1 - \frac{U_{j+1}}{U_j}}{\frac{U_{j-1}}{U_j} - 1} = \frac{b_{j-1}}{b_j} \cdot \frac{(i\omega)r_j}{(i\omega)r_{j-1}} - \frac{(i\omega)r_j}{b_j} = \frac{(i\omega)r_j}{b_j} \left(\frac{1}{\frac{(i\omega)r_{j-1}}{b_{j-1}}} - 1 \right) \quad (30)$$

(30)式に(25)式を代入し, さらに(18)式を代入して次式を得る.

$$\begin{aligned} g_j &= \frac{(i\omega)r_j}{b_j} \left\{ \frac{\frac{(i\omega)^2}{b_j} m_j + \frac{b_{j-1}}{b_j} + \frac{(i\omega)r_j}{b_j}}{\frac{(i\omega)^2}{b_j} m_j + \frac{(i\omega)r_j}{b_j}} - 1 \right\} \\ &= \left\{ \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_j + O_j(\omega^2) \right\} \frac{k_{j-1} + (i\omega)c_{j-1}}{k_j + (i\omega)c_j} \\ &= \frac{(i\omega)^2}{k_j + (i\omega)c_j} m_j + \left\{ \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} + (i\omega) \alpha_j + O_j(\omega^2) \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

(31)式を $\omega=0$ の周りでテイラー展開して次式を得る.

$$\begin{aligned} g_j &\cong \frac{k_{j-1}}{k_j} \\ &+ \frac{(i\omega)}{\frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1}} \left\{ \left\{ \alpha_j \frac{k_{j-1}}{k_j} + \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \frac{c_{j-1} k_j - c_j k_{j-1}}{k_j^2} \right\} \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \frac{k_{j-1}}{k_j} \alpha_j \right\} + O(\omega^2) \\ &= \frac{k_{j-1}}{k_j} + (i\omega) \frac{\frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-2}}{\frac{1}{k_j} \left(\sum_{i=j}^N \frac{1}{k_i} \right)^{-2}} \cdot \frac{c_{j-1} k_j - c_j k_{j-1}}{k_j^2} + O(\omega^2) \\ &= \frac{k_{j-1}}{k_j} + (i\omega) \frac{k_{j-1}}{k_j} \left(\frac{c_{j-1}}{k_{j-1}} - \frac{c_j}{k_j} \right) + O(\omega^2) \end{aligned} \quad (32)$$

(32)式の右辺第1項により(28)式が示された.

(証明終)

(28), (29)式は, 変位応答の代わりに速度や加速度応答を用いた場合にも適用可能であることを示す. これは, 加速度のフーリエ変換 $\ddot{U}(\omega)$ 及び速度のフーリエ変換 $\dot{U}(\omega)$ に関する関係式

$$\ddot{U}(\omega) = (i\omega)^2 U(\omega), \quad \dot{U}(\omega) = i\omega U(\omega) \quad (33)$$

より, (29)式の $U(\omega)$ の代わりに $\ddot{U}(\omega)$ あるいは $\dot{U}(\omega)$ を用いても(29)式の $g_j(\omega)$ は変わらないことから示される.

本論文の提案手法は振動数 0 での極限を用いるため, 低振動数領域のデータの信頼性が重要となる, 一般に加速度計に比べて変位計や速度計の方が低振動数領域の感度が高いため, 実際のデータ収録に際しては変位計や速度計を用いることが望ましい.

次に, データの同時収録について述べる. 連続した 2 層の変位観測データの組を $d_j = \{U_j(\omega), U_{j-1}(\omega)\}$ とすると, (28), (29)式は, 2 つのデータの組 d_j , d_{j+1} に基づいて, 剛性の比率 k_{j-1}/k_j が評価できることを示している. 変位観測データの組の全集合 $D = \{d_{n+1}, \dots, d_N\}$ は, $N-n+1$ 個の加速度計を用いて $U_j(\omega)$ ($n \leq j \leq N$) を同時に観測することにより用意してもよいが, 2 つの加速度計を用いて, 連続した 2 層の観測データの組 d_j ($n+1 \leq j \leq N$) を, 加速度計の設置層を変えて繰り返し観測することで用意してもよい. これは本提案手法の特徴の一つであり, 応答の比率は入力の時刻歴と無関係であるという(10)式より示される性質と, (29)式の右辺が 2 つの応答の比率 $U_j(\omega)/U_{j-1}(\omega)$, $U_{j+1}(\omega)/U_j(\omega)$ の関数であることより導かれる.

3.2.3 荷重入力層以下の層の減衰係数比率の同定

荷重入力層以下の層において, 連続した 2 層の振動数領域における変位応答の比率を用いて層減衰係数の関係式を得ることができる. 尚, 減衰係数の大きさの決定法については, 3.2.4 節において論じる.

(32)式の右辺第 2 項により, 減衰係数の同定に関する次の特性が成立する.

(特性3)

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \operatorname{Im}[g_j(\omega)] = \frac{k_{j-1}}{k_j} \left\{ \frac{c_{j-1}}{k_{j-1}} - \frac{c_j}{k_j} \right\} \quad (n+1 \leq j \leq N) \quad (34)$$

(34)式より, 全剛性が既知であれば, $g_j(\omega)$ の虚部の勾配の $\omega \rightarrow 0$ の極限より, 連続した 2 層の減衰係数の関係式が得られる. $N-n$ 個の(34)式はまとめて次式のように表せる.

$$\begin{Bmatrix} G_{n+1} \\ \vdots \\ G_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{n+1}} & -\frac{k_n}{k_{n+1}^2} & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_N} & -\frac{k_{N-1}}{k_N^2} & \cdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_n \\ \vdots \\ c_N \end{Bmatrix} \quad (35)$$

ここで、

$$G_j = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \text{Im}[g_j(\omega)] \quad (36)$$

(35)式において、未知量は $N-n+1$ 個の減衰係数 c_j ($n \leq j \leq N$) であり、式の数 $N-n$ 個であるため、(35)式より 1 つの減衰係数のみを独立なパラメータとして、他の減衰係数を表す式を得ることができる。以下に、 c_N を独立なパラメータとした例を示す。(35)式の右辺の c_N に関する項を左辺に移項して(37)式を得る。(37)式より、指定した c_N に対応する c_j ($n \leq j \leq N-1$) を得ることができる。

$$\begin{Bmatrix} G_{n+1} \\ \vdots \\ G_N \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\frac{k_{N-1}}{k_N^2} \end{Bmatrix} c_N = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{n+1}} & -\frac{k_n}{k_{n+1}^2} & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_N} & -\frac{k_{N-1}}{k_N^2} & \cdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_n \\ \vdots \\ c_{N-1} \end{Bmatrix} \quad (37)$$

(37)式の右辺の係数行列は、対角成分及びその一つ上の成分だけが非零の値を持ち、剛性のみを用いて表される。剛性が 0 でなければ、この行列の各列ベクトルは互いに線形独立となり、 c_N に対する各減衰係数の比は一意に求められる。その結果、減衰係数の同定においては剛性の同定精度が直接影響するといえる。

応答から入力や構造物特性を同定する一般的な逆問題においては、ノイズの影響などに起因して解の唯一性や安定性が問題となる場合があるが、本提案手法では、剛性の同定についても解の唯一性が保証され、比較的安定性も高いことを示すことができる。応答データにノイズが含まれる場合も、(28)式より、連続する 3 つの床の応答を用いて連続する 2 層の剛性の比率を一意に同定できる。これは、3.3 節において議論するように、静的載荷時 ($\omega \rightarrow 0$) には任意の層間変位の比率に対して各層剛性の比率を一意に決定できることと対応している。さらに剛性の大きさも、3.2.4 節において議論する方法によって一意に決定することができる。すなわち、本提案手法においては、観測データにノイズが含まれる場合も、ノイズの影響は受けるものの一般には剛性については解の唯一性が保証される。

特殊なケースとして、ノイズの影響によって $U_{j+1}(\omega)/U_j(\omega)$ または $U_{j-1}(\omega)/U_j(\omega)$ の振動数 0 での極限値が 1 に近接するような場合には、(29)式より関数 $g(\omega)$ が $\omega \rightarrow 0$ において 0 に収束するか、または発散して誤差が拡大する可能性がある。ただし 5 節の実測データを用いた例に示すように、SN 比が比較的大きくノイズの影響が小さいと考えられる場合には、このようなことはほとんど起こらないと考えられる。ノイズの影響については稿を改めて論じる予定である。

3.2.4 剛性レベル及び減衰係数レベルの決定

3.2.2, 3.2.3 節に示した方法で、各層の剛性の比率及び、各層の減衰係数間の関係式が得られる。このとき、剛性及び減衰係数の大きさはそれぞれ、以下の手順により求められる。

剛性の大きさについては、別途観測された 1 次固有円振動数 $\hat{\omega}^{(1)}$ に基づき決定することができる。すなわち、3.2.2 節の手法により剛性の比率が得られれば、1 つの剛性のみが独立なパラメータとなる。独立したパラメータとなる剛性を k_p とし、 k_p の大きさを変動させ

たときの 1 次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ を固有値解析により逐次求め、その値が別途観測された 1 次固有振動数 $\hat{\omega}^{(1)}$ に一致するときの剛性値 $\hat{k}_p$ を正解として採用する (図 5(a))。

減衰係数の大きさについては、別途観測された 1 次減衰定数 $\hat{h}^{(1)}$ に基づき決定することができる。3.2.3 節の手法により減衰係数間の関係式が得られれば、1 つの減衰係数のみが独立なパラメータとなる。独立したパラメータとなる減衰係数を c_p とし、 c_p の大きさを変動させたときの 1 次減衰定数 $h^{(1)}$ を複素固有値解析により逐次求め、その値が別途観測された 1 次減衰定数 $\hat{h}^{(1)}$ に一致するときの減衰係数の値を正解として採用する (図 5(b))。尚、減衰係数の同定については、 $\omega \rightarrow \infty$ の極限を利用するのであれば、全層の剛性が同定された段階で、2.2 節の手法を適用することも可能である。

3.3 $\omega \rightarrow 0$ の極限を用いた同定法の物理的解釈

本論文で提案する同定法は、特定の関数の $\omega \rightarrow 0$ の極限を用いる。本節では、 $\omega \rightarrow 0$ の極限をとる物理的な意味について考察することにより、別のアプローチから、地動入力時の剛性・減衰同定のための(8),(9)式及び、建物内部入力時の剛性・減衰の同定のための(28),(34)式を導出する。本節においては、厳密な証明によらず物理的な解釈に基づいて $\omega \rightarrow 0$ における変形状態を想定する。

まず、地動入力を受ける構造物の $\omega=0$ 近傍の変形状態は、図 6 のように想定できる。これは、非常にゆっくりとした入力を受ける構造物が、層間変形を生じずに全層一体となって変形する状態として理解できる。このとき、全層の絶対変位は地動の変位に一致し、 $U_1(\omega)=\cdots=U_N(\omega)=Z(\omega)$ が成立する。この性質を用いると、図 7 の自由体の釣合いは、次のように書き換えられ、地動入力時の同定の式(8)、(9)式に相当する(38)式を導くことができる。

$$\begin{aligned} & -\sum_{i=1}^j \{ (i\omega)^2 m_i U_i \} = \{ (i\omega) c_j + k_j \} (U_j - U_{j+1}) \\ \Rightarrow & -\left\{ \sum_{i=1}^j m_i \right\} (i\omega)^2 U_j = \{ (i\omega) c_j + k_j \} (U_j - U_{j+1}) \\ \Rightarrow & \frac{M_j (i\omega)^2 U_j}{U_{j+1} - U_j} = (i\omega) c_j + k_j \end{aligned} \quad (38)$$

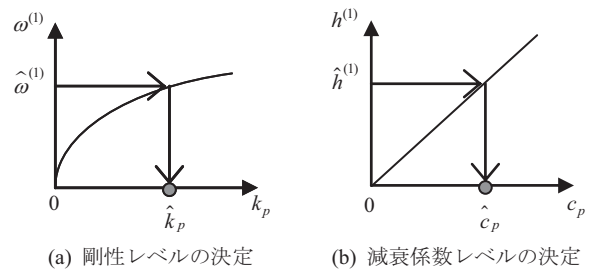


図 5 剛性・減衰係数のレベル決定の概念図

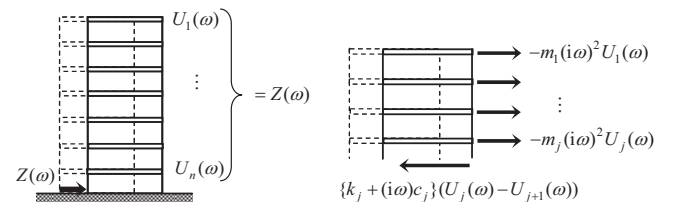


図 6 $\omega \rightarrow 0$ の変形状態 (地動入力の場合)

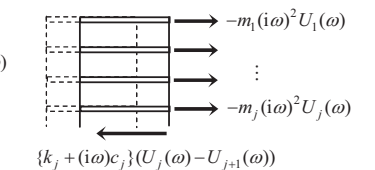


図 7 層せん断力と慣性力の釣合い

次に、内部入力（振動源）を有する建物の $\omega=0$ 近傍の変形状態は、図 8 のように想定できる。これは、静的荷重が載荷された状態として理解できる。このとき、荷重入力層より上層については、層間変形が生じず絶対変位が共通となる。荷重入力層より下層については、層せん断力が共通となり、層間変位は剛性に反比例する。この性質から、応答の極限の形状を見ることにより、入力のある層を特定することが可能となる。荷重入力層より下層において、第 j 層の運動方程式をフーリエ変換して次式を得る。

$$(i\omega)^2 m_j U_j + \{(i\omega)c_j + k_j\}(U_j - U_{j+1}) - \{(i\omega)c_{j-1} + k_{j-1}\}(U_{j-1} - U_j) = 0 \quad (39)$$

図 8 より、建物内部入力時には、 $\omega=0$ 近傍において、 U_j 、 $(U_{j-1} - U_j)$ 、 $(U_j - U_{j+1})$ はそれぞれ有限の値となる。一方、慣性力を表す項 $(i\omega)^2 m_j U_j$ は 0 に収束するため、(39)式における $(i\omega)^2 m_j U_j$ の項を無視することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} & \{(i\omega)c_j + k_j\}(U_j - U_{j+1}) - \{(i\omega)c_{j-1} + k_{j-1}\}(U_{j-1} - U_j) = 0 \\ \Rightarrow & \frac{U_j - U_{j+1}}{U_{j-1} - U_j} = \frac{(i\omega)c_{j-1} + k_{j-1}}{(i\omega)c_j + k_j} \\ \Rightarrow & \frac{1 - \frac{U_{j+1}}{U_j}}{\frac{U_{j-1}}{U_j} - 1} = \frac{[k_{j-1}k_j + \omega^2 c_{j-1}c_j] + (i\omega)[k_j c_{j-1} - k_{j-1}c_j]}{k_j^2 + \omega^2 c_j^2} \\ \Rightarrow & \frac{U_{j-1}}{U_j} - 1 \cong \frac{k_{j-1}}{k_j} + (i\omega) \frac{k_{j-1}}{k_j} \left(\frac{c_{j-1}}{k_{j-1}} - \frac{c_j}{k_j} \right) \end{aligned} \quad (40)$$

以上より、地動入力時の同定の式(32)式に相当する(40)式を導くことができる。

一般的な同定法においては、層せん断力の評価のために、全層の応答や外力が同時に観測されている必要がある。一方、本手法は、 $\omega \rightarrow 0$ の極限における振動数領域の変形状態が極めて単純となるという性質を利用することにより、入力（振動源）の時刻歴が未知の場合について、限定された層の応答のみを用いた同定を可能にしている点に特徴がある。

4. 数値例題

3 節の建物内部入力時の剛性・減衰の提案手法を、6 層モデルの 5F 床に荷重が入力されている場合（図 9）に適用する。1 次固有振動数は 1.28Hz であり、減衰は剛性比例型粘性減衰で 1 次減衰定数は 0.04 である。入力はホワイトノイズを想定し、全振動数領域において振幅 1 偏角 0 である振動数領域の荷重とする。本節においては、手法の妥当性を確認するため、変位応答のデータ $U_j(\omega)$ は、振動数領域において運動方程式を解いて得た値を用いる。

[1 次固有振動数及び 1 次減衰定数の推定]

まず、図 10(a)に $|U_j(\omega)|$ を示す。図より、固有値解析によって求めた 1 次固有振動数（1.28Hz）においてピークを有していることが分かる。また、この図より、1 次のピーク周辺においてハーフパワー法を用いると、1 次減衰定数は 0.04 と推定される。

[荷重入力層の推定]

図 10(b)に $\lim_{\omega \rightarrow 0} |U_j(\omega)|$ を示す。図 8 と対応した変形状態であることが確認でき、5F 床に荷重が作用していることが分かる。

[荷重入力層より上層の剛性・減衰の同定]

図 11 に、(8),(9)式の同定関数 $M_j(i\omega)^2 U_j(\omega) / \{U_{j+1}(\omega) - U_j(\omega)\}$ を示す。荷重入力層より上層の 6F、5F については、実部の $\omega \rightarrow 0$ の極限から、 $k_1=1000$ 、 $k_2=1200$ のように正解の剛性を同定できるこ

とが分かる。また、虚部の勾配の $\omega \rightarrow 0$ の極限から $c_1=10$ 、 $c_2=12$ のように正解の減衰係数を同定できる。

[荷重入力層より下層側の剛性の比率の同定]

図 12 に、(29)式で表される荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega) = (1 - U_{j+1}/U_j) / (U_j/U_{j-1} - 1)$ の実部及び、 $\omega \rightarrow 0$ の極限を示す。(28)式を用いて、 $\omega \rightarrow 0$ の極限より求めた各層剛性の比率を図 13 に示す。荷重入力層以下の正解の剛性の比率が推定できるといえる。

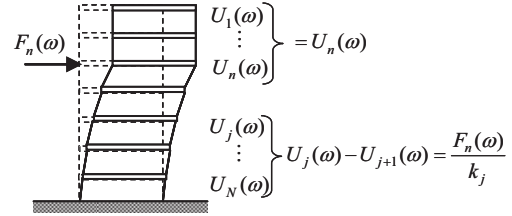


図 8 $\omega \rightarrow 0$ の変形状態（建物内部入力の場合）

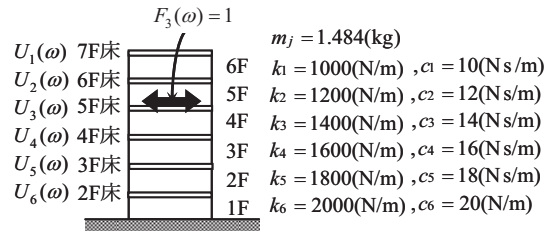


図 9 対象モデル

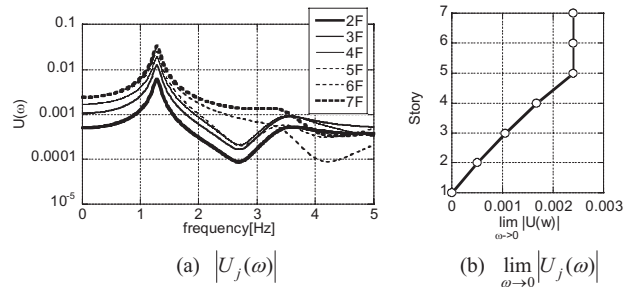


図 10 各床の変位応答のフーリエ振幅

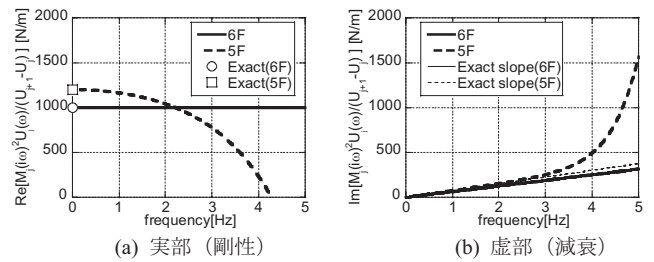


図 11 荷重入力層より上層側の同定関数

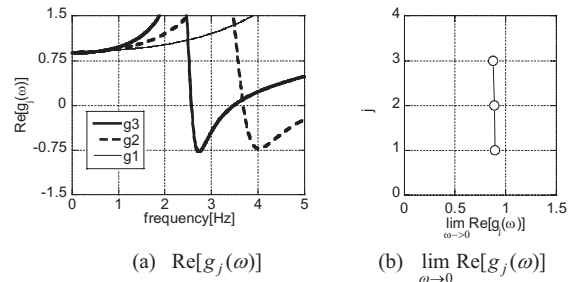


図 12 荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega)$ の実部

[荷重入力層より下層側の剛性レベルの同定]

荷重入力層以下の層（1F～4F）について図13の剛性の比率を固定し、最下層の剛性 k_6 をパラメータとして変動させて固有値解析によって逐次評価した1次固有振動数を図14に示す。上述の1次固有振動数1.28Hzに一致する場合の剛性レベルは $k_6=2002\text{N/m}$ となり、正解値2000N/mを精度良く推定できている。

[荷重入力層より下層側の減衰係数の比率の同定]

図15に、(29)式で表される荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega)=(1-U_{j+1}/U_j)/(U_j/U_{j-1}-1)$ の虚部及び、虚部の勾配の $\omega \rightarrow 0$ の極限を示す。(34)式より、剛性比例型減衰の場合は虚部の勾配の極限が0に収束することを示すことができ、この性質を図15から確認することができる。

[荷重入力層より下層側の減衰係数レベルの同定]

上記の同定関数の虚部の勾配の $\omega \rightarrow 0$ の極限を(37)式に代入して、最下層の減衰係数 c_6 をパラメータとして変動させたときの各層減衰係数を図16に示す。また、各減衰係数レベルに対応する1次減衰定数を逐次複素固有値解析によって評価した結果を図17に示す。1次減衰定数0.04に一致する場合の減衰係数レベルは $c_6=20\text{Ns/m}$ となり、正解値20Ns/mを推定できているといえる。尚、本手法は非比例減衰の場合にも適用可能であり、数値例題により非比例減衰の場合にも妥当な結果が得られることを確認している。

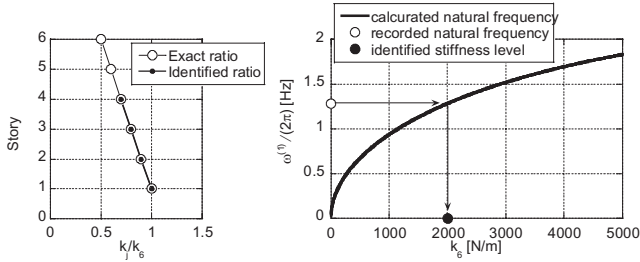
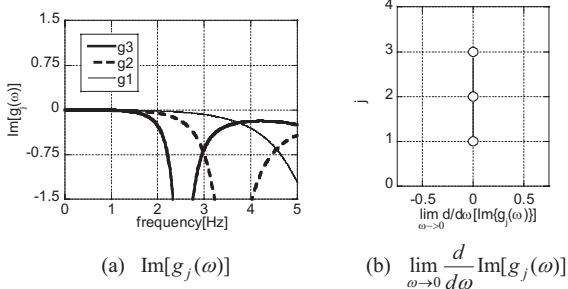


図13 $\lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}[g_j(\omega)]$ より

求めた剛性の比率 (k_j/k_6)

図14 最下層剛性

—1次固有振動数関係



(a) $\text{Im}[g_j(\omega)]$

(b) $\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \text{Im}[g_j(\omega)]$

図15 荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega)$ の虚部とその勾配

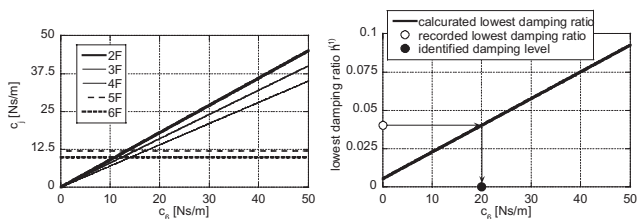


図16 $\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \text{Im}[g_j(\omega)]$ より

求めた c_j-c_6 関係 ((37)式)

図17 $c_6-h^{(1)}$ 関係

5. 模型実測データへの適用

3節の手法を、図18の3層せん断型構造物模型の実測データに適用する。特に荷重入力層以下の同定に着目し、4F床に一定振動数（約1Hz）の振動源がある場合を扱う。3.2.2節で述べた通り、本提案手法は、変位データのみならず、加速度、速度応答を用いても同様に扱えるため、センサーの感度の高い速度応答を収録した。データ収録は250Hzで約150s実施した。図19に各層の速度応答の時刻歴を示す。前述のように、層ごとの変位応答の比率は入力時刻歴に依存しないため、スペクトルのばらつきを低減するために、 $\dot{U}_j(\omega)/\dot{U}_{j+1}(\omega)$ は500サンプルの集合平均を用いた。1サンプルのフーリエ変換は4096個のデータを用いて実施し、各サンプルは40データずつずらして選んだデータを用いた。

提案する同定法の妥当性の検証のために、模型の剛性及び減衰を別の手法により求めておく。剛性については、静的水平載荷試験を行い、4F床に水平力を載荷したときの各層の層間変位より求めた各層の剛性 $k_1=24400\text{N/m}$, $k_2=40500\text{N/m}$, $k_3=40900\text{N/m}$ を正解とする。減衰係数については、自由振動の計測を行い、その結果観測された1次固有振動数3.11Hzと対数減衰率によって求めた1次減衰定数0.022を用いて、 $c_j=(2\hat{h}^{(1)}/\hat{\omega}^{(1)})k_j$ により評価された減衰係数 $c_1=54.9\text{Ns/m}$, $c_2=91.2\text{Ns/m}$, $c_3=92.1\text{Ns/m}$ を正解とする。これらの諸元を用いたシミュレーションによる理論値を比較のために下記の図に併記する。

図20に、振動数領域の各層速度応答の比率の絶対値を示す。実験とシミュレーションでよく対応しているが、約2Hz以下の低振動数領域においてやや差がみられる。図21に、同定関数 $g_j(\omega)$ の実部を示す。実験とシミュレーションでよく対応しているが、1Hz以下の低振動数領域ではSN比に起因してばらつきが大きいので、近似関数を導入する。理論値と適合度の良い4次関数 $\hat{g}_j(f)=af^4+b$ を採用し、 $\hat{g}_1(f)$ 及び $\hat{g}_2(f)$ の係数をそれぞれ0.5~2.0Hz, 3.0~9.0Hzの範囲でフィッティングするように決めた結果、 $(a,b)=(0.0051,0.59)$, $(0.000044,1.11)$ となる。 $\text{Re}[\hat{g}_2(\omega)]$, $\text{Re}[\hat{g}_3(\omega)]$ の極限はそれぞれ

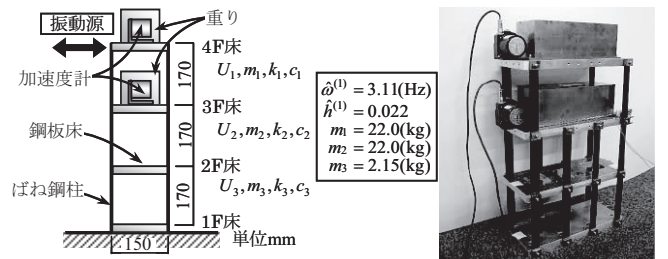
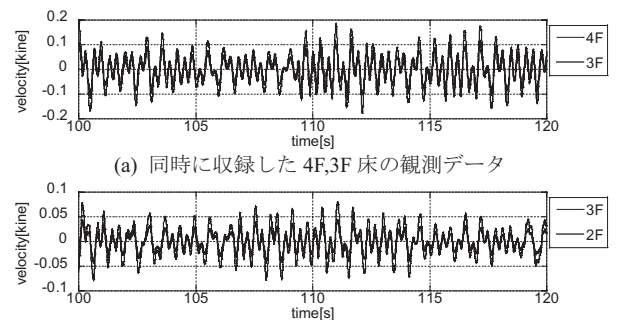


図18 3層せん断型構造物模型



(a) 同時に収録した4F,3F床の観測データ

(b) 同時に収録した3F,2F床の観測データ

図19 速度応答の観測データ

0.59 (正解は 0.60), 1.11 (正解は 0.99) と推定される。これらの値を用いて同定された各層剛性の比率を図 22(a)に、この比率を固定してレベルを変えた場合の 1 次固有振動数の変化を図 22(b)に示す。観測された 1 次固有振動数 3.11Hz となるとききの剛性レベルより、剛性値は $k_1=26400\text{N/m}$, $k_2=44200\text{N/m}$, $k_3=39800\text{N/m}$ となる。前述の正

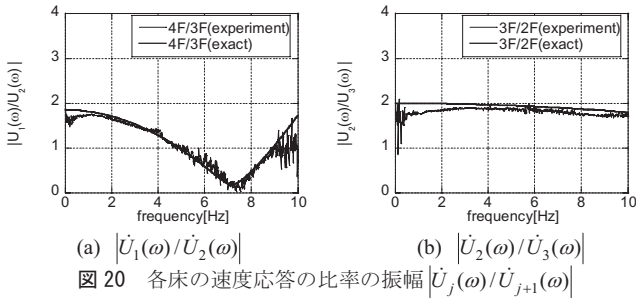


図 20 各床の速度応答の比率の振幅 $|\dot{U}_j(\omega)/\dot{U}_{j+1}(\omega)|$

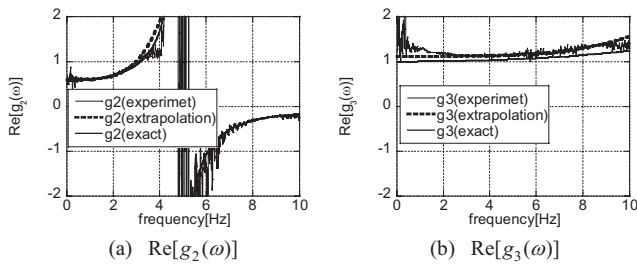


図 21 荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega)$ の実部

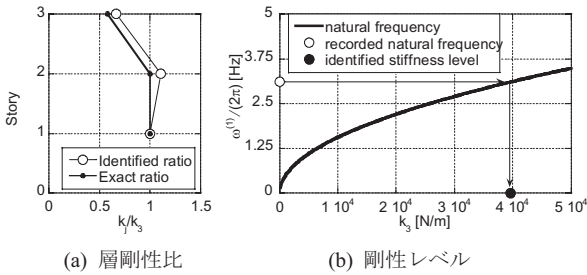


図 22 剛性比・剛性レベルの同定

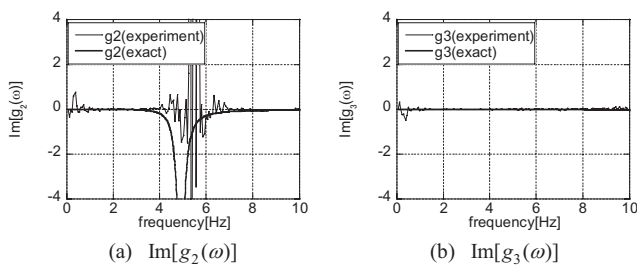


図 23 荷重入力層より下層側の同定関数 $g_j(\omega)$ の虚部

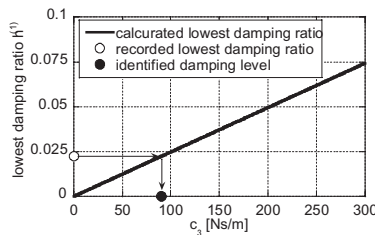


図 24 $c_3-h^{(1)}$ 関係

解と比べると、 k_2 の誤差が最も大きく、約 9%であった。この誤差の原因は、前述のように、図 20(b)の応答の比率 $|\dot{U}_2(\omega)/\dot{U}_3(\omega)|$ の $\omega \rightarrow 0$ 近傍における値が理論値より小さいことによる。

図 23 に、減衰係数の同定のための同定関数 $g_j(\omega)$ の虚部を示す。(34)式より、剛性比例型減衰の場合は $\lim_{\omega \rightarrow 0} [\text{Im}\{g_j(\omega)\}]$ が 0 に収束することを理論的に示すことができ、図 23 からこの性質を確認できる。このときの減衰係数レベルの同定を図 24 に示す。観測された 1 次減衰定数 0.022 となるとききの減衰係数値として、 $c_1=59.5\text{Ns/m}$, $c_2=99.5\text{Ns/m}$, $c_3=89.6\text{Ns/m}$ が得られる。減衰係数の同定においては剛性の誤差が直接反映されるため、 c_2 の誤差が最も大きく約 9%である。

振動源が高振動数の場合や荷重レベルが極めて小さい場合などは、低振動数領域において SN 比が小さくなり、同定の精度が低下することが予測されるため、ノイズの影響を補正する¹⁷⁾など、低振動数領域における信号の信頼性向上の工夫が必要であると考えられる。

6. 結論

- (1) 内部に時刻歴が未知の一つの振動源を有する建物について、層の剛性と減衰係数を同定する方法を提案した。本手法では、振動源の時刻歴と位置及び、全層の剛性・減衰が未知であるような現実的な場合についても、各層床面の加速度データ（あるいは速度データ）や、1 次固有円振動数、1 次減衰定数などの観測可能なデータのみを用いて同定が可能である。各層の剛性の比率及び、減衰係数相互の関係式が応答の計測データのみに基づいて得られ、剛性及び減衰係数のレベルは、別途計測した 1 次固有円振動数や、1 次減衰定数に基づいて決定することができる。
- (2) 本提案手法は、入力（振動源）が未知であっても、最低 2 つの振動計があれば、全層のデータを同時に計測することなく同定が可能である。このように限られた情報に基づいた同定が可能となるという性質は、振動数領域の応答の $\omega \rightarrow 0$ の極限を用いることに起因している。本論文では、 $\omega \rightarrow 0$ の極限を用いる物理的な意味は、慣性力の項を無視した扱いやすい変形状態を想定できる点にあることを示した。
- (3) 数値例題を通じて提案手法の妥当性を理論的に示した。また、模型実験の実測データに提案手法を適用し、提案手法の妥当性と精度を明らかにした。

謝辞

本研究の一部は、平成 18-19 年度文部科学省科学研究費補助金 [萌芽研究]、平成 20-21 年度文部科学省科学研究費補助金 [若手研究 B] による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) G.Housner, et al. Special issue; Structural control: past, present, and future. *J. Engng. Mech.*, ASCE, **123**(9), pp.897-971, 1997.9
- 2) Proc. of the Fourth World Conference on Structural Control and Monitoring (4WCSCM), San Diego, pp.11-13, 2006.7
- 3) 近藤一平, 濱本卓司: 振動台実験のランダム応答データを用いた多層建築物の損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No.473, pp.67-74, 1995.7
- 4) 濱本卓司, 森田高市, 勅使川原正臣: 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.93-100, 2002.10

- 5) 金子佳生, 三田 彰, 三橋博三, 金指成昭: 鉄筋コンクリート造架構の層剛性と柱脚回転角を利用した損傷評価, —有限要素法解析による損傷評価とその活用—, 日本建築学会構造系論文集, No.562, pp.91-98, 2002.12
- 6) 斎藤知生, モード解析型多入力多出力ARXモデルを用いた高層建物のシステム同定: 日本建築学会構造系論文集, No.508, pp.47-54, 1998.6
- 7) 斎藤知生, 神田 順: 構造物のシステム同定における推定値の確率論的誤差評価, 日本建築学会構造系論文集, No.534, pp.41-48, 2000.8
- 8) 原口 圭, 神田 順, 稲垣光剛: 常時微動測定による中低層建物を対象とした地盤・建物相互作用系の同定手法, 日本建築学会構造系論文集, No.564, pp.31-38, 2003.2
- 9) 吉元怜毅, 三田 彰: 部分空間法及び部分構造アプローチを用いた免震構造物の層剛性及び減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, No.569, pp.31-36, 2003.7
- 10) 吉元怜毅, 三田 彰: 多入力多出力モデルに基づく建築構造パラメタのオンライン同定, 日本建築学会構造系論文集, No.574, pp.39-44, 2003.12
- 11) 曾根 彰, 山本鎮男, 増田 新: 入出力のウェーブレット変換を用いた多自由度系のパラメトリックなシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.61-66, 1998.10
- 12) 来田義弘, 中村 豊, 竹脇 出, 上谷宏二: 非線形システム同定法による高減衰ゴムダンパー力学モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, No.531, pp.63-70, 2000.5
- 13) 仁田佳宏, 西谷 章: 絶対加速度応答のみの計測に基づく2段階からなる構造システム同定, 日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.91-98, 2003.6
- 14) 中村 充, 竹脇 出, 安井 譲, 上谷宏二: 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.75-82, 2000.2
- 15) I.Takewaki and M.Nakamura: Stiffness-damping simultaneous identification under limited observation, *J. Engng. Mech.*, ASCE; **131** (10), pp.1027-1035, 2005.10
- 16) F.E.Udwadia: Some uniqueness results related to soil and building structural identification, *J. Appl. Math.*, SIAM; **45**(4), pp.674-685, 1985.8.
- 17) 吉富信太, 竹脇 出: 小振幅定常ランダム入力を用いた建築構造物のシステム同定におけるノイズバイアスの補正法, 日本建築学会構造系論文集, No.627, pp.757-764, 2008.5

(2009年5月8日原稿受理, 2009年8月4日採用決定)